

ローモンタイトの変質によるコンクリート劣化に関する研究

Study on Deterioration of Concrete due to Transformation of Laumontite

渡邊 凌[†], 岩月 栄治^{††}

Ryo Watanabe, Eiji Iwatsuki

Abstract : Laumontite is a harmful mineral for concrete. Standard specifications for concrete structures described that laumontite and its dehydration material leonhardite would need care because there was volume change between laumontite and leonhardite due to drying and wetting. This action causes cracks in the concrete. However, no standards or conditions have been set for the use of laumontite -bearing aggregates. The purpose of this study is to consider the effect on concrete and the formulation of deterioration countermeasures when using laumontite-bearing aggregates. First, qualitative and quantitative analysis using X-ray diffraction was performed on aggregates in New Caledonia and Japan. Next, cement paste containing single crystal of laumontite and mortar containing laumontite-bearing aggregates was prepared for deterioration reproduction and exposed in an environment where wetting and drying were repeated. Then, Density-enhanced mortar containing cement admixture was produced to prevent deterioration and exposed in a repeated dry and wet environment. From these results, deterioration was confirmed in the cement paste containing the single crystal of laumontite. On the one hand, no deterioration was confirmed in the mortar containing laumontite-bearing aggregates at the age of 196 days. Then, it was confirmed that the mortar containing the admixture tended to have higher strength than the mortar not containing the admixture.

1. はじめに

1・1 研究背景

コンクリートの劣化で骨材に起因する例としてローモンタイト(Laumontite)がある。

ローモンタイトがコンクリートに好ましくないことは 1923 年 Pearson¹⁾が初めて報告した。1969 年には、ASTM C 294²⁾でローモンタイトは乾燥湿潤の変化に伴い体積変化を起こすため、要注意であることが記載された。日本では 1979 年に有泉³⁾により、Pearson¹⁾の引用と劣化事例が紹介された。1981 年には丸、柳田⁴⁾により、劣化原因として①乾湿の変化に伴うローモンタイトの体積変化、②ローモンタイトの乾燥時の脱水に伴う粉化、③ローモンタイトとセメント中のカルシウム(Ca)との化学反応、④ローモンタイトの水の放出などが示され、これらにより表面剥離、強度低下、ポップアウトを引き起こすとされている。その他、尾藤ら⁵⁾、重倉⁶⁾、日本コンクリート協会⁷⁾、藤井ら⁸⁾、川村⁹⁾などによっても、ローモンタイトがコンクリートに有害であるとされており、ローモンタイトを骨材として使用した実験的な検証は脇坂¹⁰⁾による報告事例がある。

現在、ニューカレドニアではローモンタイトによる劣

化の被害が深刻な社会問題となっている¹¹⁾。これは、ニューカレドニアで用いられている本国フランスの NF(フランス国家規格)にローモンタイトの使用に関する記載がされておらず、ローモンタイト含有骨材によるコンクリート劣化の知見がなかったことが原因である。

このようなことから、本国フランス政府や外務省を通じて本学へ劣化対策策定の検討の依頼があった。

ローモンタイトは火山地帯での産出が多く、アメリカ西海岸¹²⁾やチリ¹³⁾でもローモンタイトによる被害事例があるが、この劣化は日本であまり知られていない。ローモンタイトは火成岩や堆積岩に存在するため、日本全国の広い地域で産し、現在日本のコンクリート標準示方書[施工編]¹⁴⁾には注意のみが記載されており、今後の検討項目とされている。日本での被害事例は少なく、これは骨材生産の過程で密度が小さいローモンタイトを含む岩石は除かれている可能性がある。しかし、ダムコンクリート生産時は骨材を生産する原石山で良質な骨材の選定が難しい場合は使用せざるを得ない状況である。九州のダムでは竣工後堤体表面に細かいクラックが入り、堤体の角の部分は砂状になり表面のコンクリートが崩れ落ち、粗骨材がむき出しとなった被害がある¹⁵⁾。

良質な骨材の採取が困難な日本で、この劣化は将来問題になる可能性が否定できず、ニューカレドニアだけではなく、日本でもローモンタイトに関する新たな見地と劣化対策が必要である。

[†] 愛知工業大学大学院 建設システム工学専攻

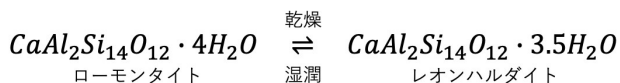
^{††} 愛知工業大学 工学部 土木工学科

1・2 研究の目的

本研究はローモンタイトによるコンクリートへの影響と劣化対策を検討するため、ニューカレドニアと日本で採取したサンプルに対してローモンタイトの含有の確認を粉末 X 線回折による定性分析で行った。その後、内部標準法を用いて、ローモンタイトの検量線を作成して含有量を推定した。次に、乾燥湿潤の繰り返しによるローモンタイトの変質の形態観察とコンクリートへの影響を確認するため、ローモンタイトの単結晶とセメントペーストに単結晶を埋没させた供試体を乾燥湿潤促進環境で曝露させた。また、含有が確認されサンプルを使用して供試体を作製し、屋外、屋内、湿潤乾燥の繰り返し促進での劣化観察と強度低減の測定を行った。さらに、劣化抑制対策としてフライアッシュ、高炉スラグを混和材として使用した供試体を作製し、乾燥湿潤繰り返し促進環境下にて曝露し、曲げ試験及び圧縮試験を行った。

2. ローモンタイトの特徴と含有コンクリートの劣化機構

ローモンタイトはゼオライト(沸石)の一種で、結晶は四角柱状で端面が切られたような形状をしている。ローモンタイトは火山岩の空隙、溶岩と海水の反応産物、地熱帯の変質・編成鉱物などとして、様々な環境で生成している。ローモンタイトは乾燥すると体積を 1.5~3% 圧縮してレオンハルダイト(Leonhardite)に変化する^{3) 16) 17)}。またこれを湿潤すると 1N/mm² 程度の膨張圧で体積を膨張してローモンタイトに戻る¹⁸⁾。これは次式で示される。



コンクリート表面下でローモンタイトが降雨などの乾湿が繰り返されると、セメントペーストとの付着面で疲労破壊が発生する。これが長期に渡るとひび割れがコンクリート表面に達してポップアウトや表面剥離が生じる(写真-1)。この時ローモンタイトの結晶中では結晶構造の変化によりひび割れが進行し、粉状化する。



写真-1 ローモンタイトによる表面剥離の様子¹¹⁾

3. ローモンタイト含有サンプルの定性分析および定量分析¹⁹⁾

3・1 分析に使用したサンプル

ニューカレドニアから入手したサンプルはローモンタイトの含有が現地で確認されており、含有量の多い順から No.1, No.2, No.3 と非含有の No.4 の 4 つのサンプルである。このうち No.1 のみ白色の岩石が混入しており、そのみを回収してサンプルとした No.1(白)の計 5 種類のサンプルを回折した。

日本国内(四国)のサンプルは、ローモンタイトの含有の可能性があるとされている地域で産した玄武岩、玄武岩(白脈)、風化花崗岩の粗砂、砕砂、脱水ケーキの 5 種類のサンプルを回折した。また、各サンプルのローモンタイトの含有の確認や定量をするためインド産のローモンタイトの単結晶を標準試料として用いた。

3・2 実験方法

定性分析は各サンプルを粒径 0.15mm 以下に粉碎し、粉末 X 線回折装置でピークデータを抽出し、ICDD(国際回折データセンター)のデータベースと照合して分析を行なった。X 線回折条件を表-1 に示す。

定量分析には内部標準法を用いた。内部標準法とは、測定試料に一定量の標準物質を加え、測定試料と標準物質の X 線回折強度比を求めると、一定の比例関係を示すことを利用して行う定量法である²⁰⁾。この方法は、あらかじめ純粋な鉱物とそれ以外の物質を各種の割合で混ぜ合わせ、一定量の標準鉱物を混ぜ X 線回折を行い、純粋な鉱物と標準鉱物の回折線強度比と、その重量%の関係を求めておく。次に、測定試料に検量線を作成したときと同じ割合で標準鉱物を混ぜ測定試料中の定量対象の鉱物と標準鉱物の回折強度比を求め、既に得られている検量線からその重量%を求める。本研究では、内部標準物質には特級試薬のフッ化リチウム(LiF)を、母材には試薬のけい砂(Silica Sand)を用い、ローモンタイト結晶を 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20% 含有させた X 線試料を作製し、各試料を 5 回測定し、第一強線のピーク(9.3°(2θ Cukα1))の平均をその試料のピーク強度とした。各試料の配合は表-2 に示す。これを用いて検量線を作成し定量分析を行った。X 線回折の条件は定性分析と同様である。

表-1 X 線回折条件

	条件
管球	Cukα1
管電圧	40kV
管電流	30mA
走査範囲	5° ~70°
走査速度	0.5° /min

表-2 定量分析に使用した試料

ローモンタイト 含有量 (%)	ローモンタイト (g)	LIF (g)	けい砂 (g)	計 (g)
1	0.10	1.00	8.90	10.00
2	0.20	1.00	8.80	10.00
4	0.40	1.00	8.60	10.00
6	0.60	1.00	8.40	10.00
8	0.80	1.00	8.20	10.00
10	1.00	1.00	8.00	10.00
15	1.50	1.00	7.50	10.00
20	2.00	1.00	7.00	10.00

3・3 結果および考察

粉末 X 線回析により得たローモンタイトの標準試料、ニューカレドニアのサンプル及び国内のサンプルの粉末 X 線回析図を図-1、図-2、図-3に示す。ローモンタイト標準試料の回析結果から第一強線(I₁)9.3°、第二強線(I₂)21.3°、第三強線(I₃)12.3°で出現した。ニューカレドニアのサンプルからは回析角 9.3°付近で No.1~3 の順に高さの異なるピークが出現した。これをローモンタイトの標準試料から得られた3強線と比較するとこれはローモンタイトであると考えられる。しかし、No.1(白)からはローモンタイトと考えられるピークは検出されなかった。国内サンプルに対する回析では砕砂、粗砂、玄武岩(白脈)からはローモンタイトは確認できなかったが、玄武岩、風化花崗岩、脱水ケーキからはローモンタイトに近似したピークが出現した。

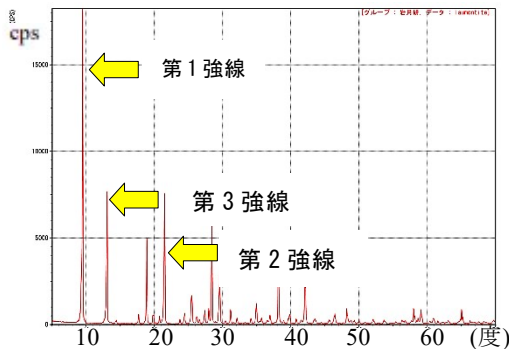


図-1 ローモンタイト標準サンプルの X 線回析図

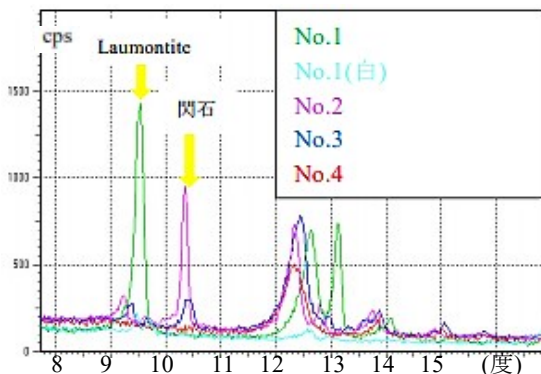


図-2 ニューカレドニアのサンプルの X 線回析図

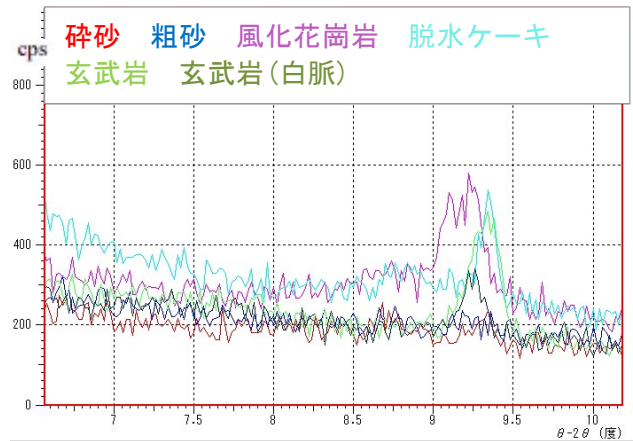


図-3 国内のサンプルの X 線回析図

粉末 X 線回析の結果を元に ICDD を用いて定性分析を行い、各サンプルに含有していると考えられるニューカレドニアのサンプルと国内のサンプルの鉱物を表-2、表-3に示す。

ニューカレドニアのサンプル No.1, No.2, No.3 の結果からはローモンタイトの存在が確認された。また、ローモンタイト以外のコンクリートに対する有害鉱物は確認されなかった。

四国のサンプル玄武岩、風化花崗岩、脱水ケーキの結果からローモンタイトは確認できず、強線の近似する鉱物の含有の可能性がある。これは X 線強度の値が小さく、ローモンタイトの第一強線 9.3° 付近で出現した強線はずれがあり、9° 付近は粘土鉱物が複数存在することからローモンタイトの含有の可能性が低いと考えられる。

表-2 ニューカレドニアのサンプルの
粉末 X 線回析による定性分析の結果

試料	含有鉱物				
No.1	石英	方解石	緑泥石	ローモンタイト	スメクタイト
No.1(白)	石英				
No.2	石英	緑泥石	曹長石	閃石	ローモンタイト
No.3	石英	緑泥石	ローモンタイト		
No.4	石英	方解石	灰長石	輝石	

表-3 国内のサンプルの
粉末 X 線回析による定性分析の結果

試料	含有鉱物				
玄武岩	石英	緑泥石	方解石	スメクタイト	
玄武岩(白脈)	方解石				
風化花崗岩	石英	スメクタイト			
粗砂	石英	曹長石			
砕砂	石英	曹長石			
脱水ケーキ	石英	曹長石	緑泥石	スメクタイト	

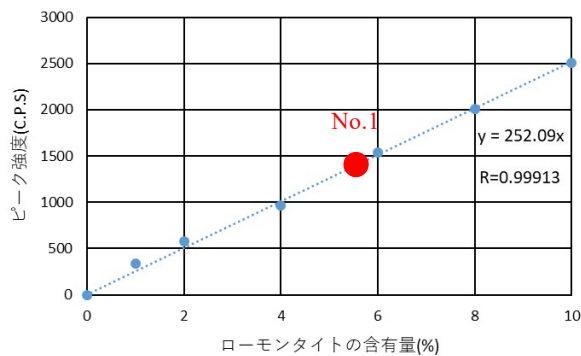


図-4 今回作成したローモンタイトの検量線

ローモンタイトの標準試料から作成した検量線を図-4に示す。この検量線を使用してニューカレドニアのサンプルのローモンタイトの含有量が多いとされる No.1 を定量分析した結果、含有量は約 6%であった。No.2, No.3 は 1%未満であった。No.1 は日本で使用される骨材のローモンタイトの許容量の目安 1~2%²¹⁾を上回っており、骨材として使用するにはふさわしくないことが分かる⁸⁾。

4. ローモンタイトの変質による劣化発現の形態観察と強度試験

4.1 ローモンタイトの粉状化観察

前述の分析で使用したローモンタイトの単結晶のうち 10mm 以上のものを底面 40mm のアルミ製カップに入れ、20℃の水中 2 日、80℃の乾燥炉に 2 日を 1 サイクルとした乾燥湿潤の繰り返し促進環境下にて曝露した。



写真 2 粉状化観察用のローモンタイトの単結晶

4.2 ローモンタイトの単結晶を埋没したペースト供試体の乾燥湿潤繰り返しによる形態観察

セメントにはニューカレドニアで使用されている CEM II/A-S 42.5 N CE PM-CP2 NF(普通ポルトランドシリカセメント)を使用し、W/C=40%で 25×25×50mm のペーストに 10mm 以上のローモンタイトの単結晶を複数個埋没させた供試体 3 本と埋没させていない供試体 3 本を作製した(写真-3)。これを 20℃の水中で 28 日間養生した後、20℃の水中で 2 日間、80℃の乾燥炉で 2 日間を 1 サイクルとした乾燥湿潤繰り返し環境下で曝露させた。

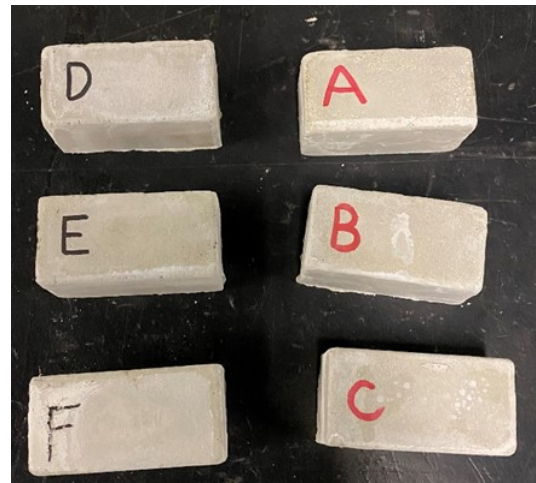


写真-3 劣化観察用のペースト供試体

4.3 ローモンタイト含有骨材を埋没させた供試体の形態観察

セメントの物理試験方法(JIS R 5201-1997)のセメント強さ試験と同様の 40×40×160mm、セメントには CEM II/A-S 42.5 N CE PM-CP2 NF を使用し、W/C=40%のモルタルにローモンタイトの含有量が最も多いニューカレドニアのサンプル No.1 の粒径 10mm 程度のものを上面から 10mm の位置に 10 個埋没させた供試体(図-5)と埋没させない供試体とを作製し、屋外条件、屋内条件、乾燥湿潤繰り返しを促進させた条件で曝露させた。乾燥湿潤繰り返し促進条件は 2 つの水槽の片方に供試体、もう一方には水を入れ、ポンプで互いの水槽に水の移動が可能になっており、プログラブルタイマーで 24 時間毎に水が移動するように設定した(図-6)。すなわち、供試体は 24 時間毎に乾燥と湿潤を繰り返す。そして任意の期間で各条件下の供試体にローモンタイトによる劣化発現の形態観察を行なった。

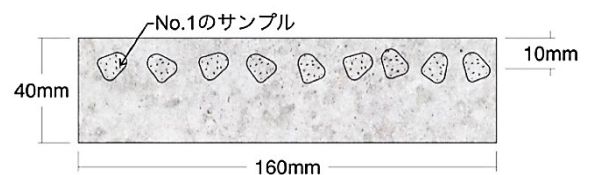


図-5 形態観察用供試体(サンプル埋没)

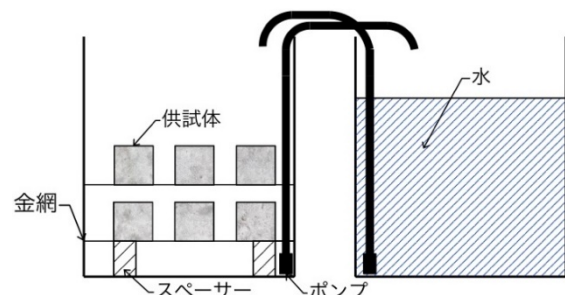


図-6 乾燥湿潤繰り返し促進試験装置

4.4 ローモンタイト含有骨材を使用したモルタル供試体の乾燥湿潤繰り返し試験

セメントには CEM II/A-S 42.5 N CE PM-CP2 NF を使用し、質量比でセメント：水：細骨材=0.4：1.0：1.5 として、供試体形状 40×40×160mm の No.1(粒径 2.5~0.3mm)を細骨材として使用したローモンタイト含有モルタル供試体と、けい砂(粒径 2.5~0.3mm)のみを使用したローモンタイト非含有供試体とを各 39 本作製した。配合表を表-4、表-5 に示す。材齢 28 日まで 20℃で水中養生を行なった後に、劣化の形態観察と同様の装置で乾燥湿潤繰り返し促進環境下に曝露した。その後、3 週間毎に曲げ強さ試験、圧縮強さ試験および質量を測定した。曲げ強さ試験は、乾燥した 3 本の供試体を行うものとし、供試体の長軸が支持用ロールと直交するように置き、成形したときの側面の中央に、載荷して最大荷重を求める。圧縮強さ試験は、供試体を成形したときの両側面を加圧面とし、荷重用加圧板を用いて供試体の折片の中央部に載荷して最大荷重を求める。その後、各供試体の曲げ強さおよび圧縮強さを算出した。

表-4 ローモンタイト含有モルタル供試体の配合表

	セメント	水	細骨材	計
質量比	1.0	0.4	1.5	2.9
密度(g/cm ³)	3.03	1.00	2.58	
単位質量(g)	0.11	0.14	0.20	0.45
単位体積(cm ³)	70.9	85.9	124.8	281.6
質量(g)	214.7	85.9	322.1	622.7

表-5 ローモンタイト非含有モルタル供試体の配合表

	セメント	水	細骨材	計
質量比	1.0	0.4	1.5	2.9
密度(g/cm ³)	3.03	1.00	2.50	
単位質量(g)	0.11	0.14	0.21	0.46
単位体積(cm ³)	69.9	84.7	127.0	281.6
質量(g)	211.7	84.7	317.6	614.0

4.5 結果および考察

ローモンタイトの単結晶の粉状化の観察は、現在乾燥と湿潤を 15 サイクル経過しており、3 つすべての結晶が細かく割れ、粉状化の傾向が確認された(写真-4)。

ローモンタイトの単結晶を埋没させたペースト供試体は、養生完了後 1 サイクル目からひび割れが確認でき、10 サイクル目には 3 つすべての供試体で角部のセメントペーストが欠け、欠けた部分からローモンタイトがむき

出しになっていることが確認できた(写真-5)。また、埋没させていない供試体は劣化が確認できなかった。

ローモンタイト含有骨材を埋没させたモルタル供試体の形態観察で、材齢 196 日までは、乾燥湿潤が繰り返されない屋内暴露の供試体には劣化の発現は確認されなかった。屋外条件の供試体には材齢 91 日に一部微少な剥離、ひび割れと思われる供試体があった(写真-7)。しかし、その後材齢 196 日までひび割れや剥離等の進展は確認されず、初期乾燥収縮によるものである可能性が高いと考えられる。また、乾燥湿潤繰り返しを促進した供試体では劣化の発現は確認できなかった。

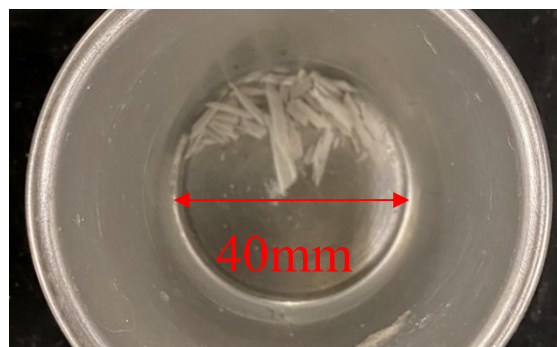


写真-4 分割したローモンタイトの単結晶(15サイクル目)

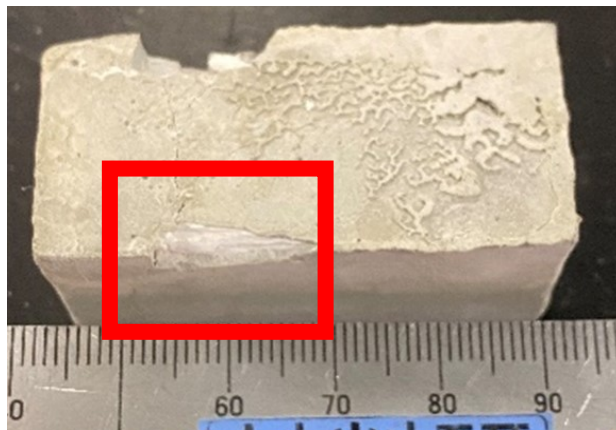


写真-5 ペーストが剥離した箇所(材齢 41 日目)



写真-6 屋外暴露させた供試体のひび割れ(材齢 91 日目)

次に、ローモンタイト含有骨材と非含有骨材を用いた供試体の材齢 196 日までの曲げ強さ、圧縮強さを図-8、図-9 に示す。ローモンタイト含有骨材の No.1 とけい砂では No.1 の方が密度が大きいので、ローモンタイト含有供試体の曲げ強さ、圧縮強さがローモンタイト非含有供試体よりも高い結果となっている。

両供試体共に材齢 196 日まで強度の増減にばらつきがあるものの、その傾向からはローモンタイトの乾燥湿潤による劣化の傾向は確認できていない。

しかし、脇坂・阿南¹⁰⁾が実施したローモンタイト含有モルタル供試体の自然環境下での曝露試験では、ローモンタイトによる劣化発現はローモンタイトの含有量と含有骨材の粒径によって変化すると結論付けられており、本実験で使用した骨材の含有量・粒径に近似する結果(図-10)では 600 日後に劣化による相対同弾性係数が減少し始めていることが確認されている。

したがって、本実験で使用した骨材の含有量・粒径では乾燥湿潤繰り返しが促進された環境ではあったが早期での劣化発現は難しく、長期による観察が必要であると考える。

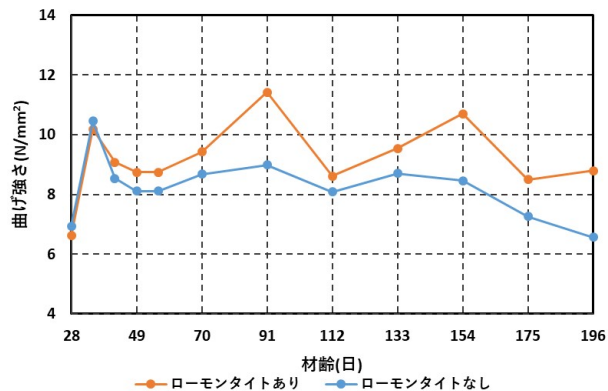


図-8 曲げ強さの推移

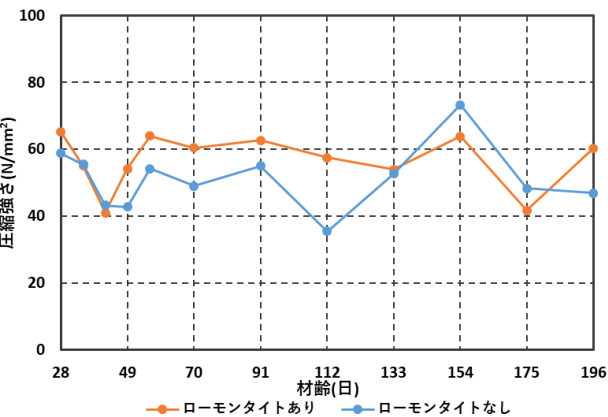


図-9 圧縮強さの推移

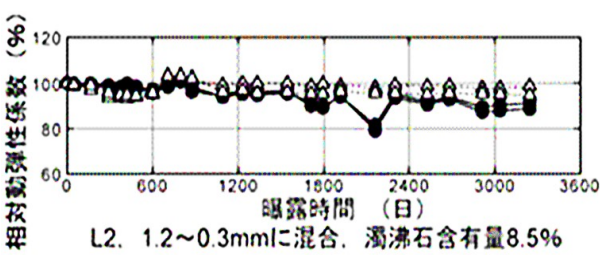


図-10 濁沸石によるコンクリートの劣化と劣化機構 (脇坂・阿南)¹⁰⁾

5. 混和材を使用したローモンタイト含有供試体の乾燥湿潤促進試験

5.1 実験方法

ローモンタイトによるコンクリート劣化抑制対策として、モルタルの水密性を向上させ水の浸入と浸出を抑えるため、(株)テクノ中部の中部フライアッシュ(JIS A6201 II)(表-6)と、エスメント中部(株)のエスメントスーパー60(高炉スラグ微粉末 JIS A 6206)(表-7)を混和材として使用した。配合表は表-8、表-9、表-10 に示す。40×40×160mm の型枠に、セメントは CEM II/A-S 42.5 N CE PM-CP2 NF を使用し、細骨材はニューカレドニア産の No.1(1.2~10.0mm)を使用した。混和材を使用した供試体と、混和材を使用しない供試体とを各 33 本作製した。また、劣化が発現しないよう屋内で曝露させる混和材を使用しない供試体を 33 本作製した。打設後養生 21 日まで 20℃の水中養生を行った。

養生後、湿潤乾燥繰り返し促進環境で曝露を行い、20℃の水中で 2 日間、80℃の乾燥炉で 2 日間を 1 サイクルとした。その後、5 サイクル毎に 4 章と同様の手順で曲げ強さ試験および圧縮強さ試験を実施した。

表-6 中部フライアッシュの諸性質²²⁾

JIS規格 II 種	二酸化けい素含有量	湿分	強熱減量	密度	粉末度	
					45μm ふるい残分	比表面積
	45.0% 以上	1.0% 以下	5.0% 以下	1.95g/cm ³ 以上	40%以下	2500cm ² /g 以上

表-7 エスメントスーパー60 の諸性質²³⁾

項目	実用例	規格値
密度	g/cm ³	2.89
比表面積	cm ² /g	6100
活性指数 (%)	7日	95
	28日	105
	91日	118
フロー値比	%	99
酸化マグネシウム	%	5.0
三酸化硫黄	%	2.0
強熱減量	%	1.1
塩化物イオン	%	0.003
塩基度		1.85

表-8 フライアッシュを 15%置換した配合表

	セメント	フライアッシュ	水	細骨材
質量比	0.85	0.15	0.4	1.5
密度	2.99	2.1	1	2.58
単位質量	0.10	0.02	0.14	0.20
単位体積	59.9	15.0	84.2	122.4
質量 (g)	179.0	31.6	84.2	315.9

表-9 高炉スラグ微粉末を 40%置換した配合表

	セメント	高炉スラグ	水	細骨材
質量比	0.6	0.4	0.4	1.5
密度	2.99	2.6	1	2.58
単位質量	0.07	0.05	0.14	0.20
単位体積	42.3	32.4	84.3	122.6
質量 (g)	126.5	84.3	84.3	316.2

表-10 混和材無の配合表

	セメント	水	細骨材
質量比	1	0.4	1.5
密度	2.99	1	2.58
単位質量	0.12	0.14	0.20
単位体積	71.6	85.6	124.4
質量 (g)	214.0	85.6	321.0

5.2 実験結果

材齢 81 日(20 サイクル)までの曲げ強さ試験および圧縮強さ試験の推移と、養生後の強度を 0 としてその後の強度の変化量に変換したものを図-11、図-12、図-13、図-14 に示す。乾燥と湿潤を繰り返さない屋内曝露の供試体はローモンタイトの変質が起らないため材齢毎に強度が増進している。一方、乾燥湿潤を繰り返した混和材無の供試体は材齢毎に曲げ強度、圧縮強度が低下している。5 サイクル時点では混和材を使用した供試体の圧縮強度が混和材無の強度よりも下回っているが、15 サイクル時点では強度が増進し、混和材無の供試体を上回っている。これは初期強度に優れないが長期強度に優れるフライアッシュセメント、高炉セメントの特徴のためであると考ええる。また、0 サイクル時に乾燥湿潤繰り返し促進環境下の混和材無の供試体に対してフライアッシュを 15%置換した供試体は曲げ強さ、圧縮強さともに下回っていたが、変化量の傾向や 15 サイクル時点での曲げ強さ、圧縮強さの結果からローモンタイトの変質の影響を受ける場合、セメント量の 15%をフライアッシュに置換したほうが強度を増進する傾向にあると考える。高炉スラグ微粉末を 40%置換した供試体も強度が増加傾向にあり、抑制の効果が現れる可能性がある。しかし、材齢 81 日時

点での傾向であり、強度増進後ローモンタイトの影響により強度が低下する可能性があるため、長期での観察が必要である。

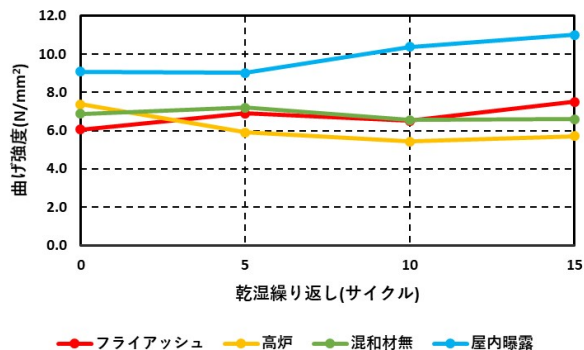


図-11 曲げ強さの推移

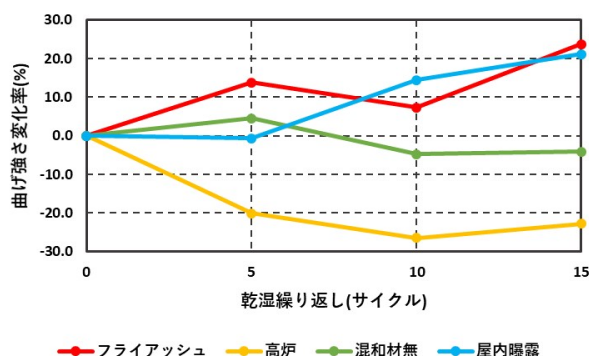


図-12 曲げ強さ(変化量)の推移

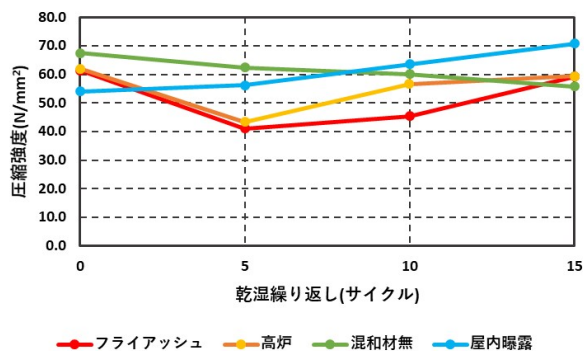


図-13 圧縮強さの推移

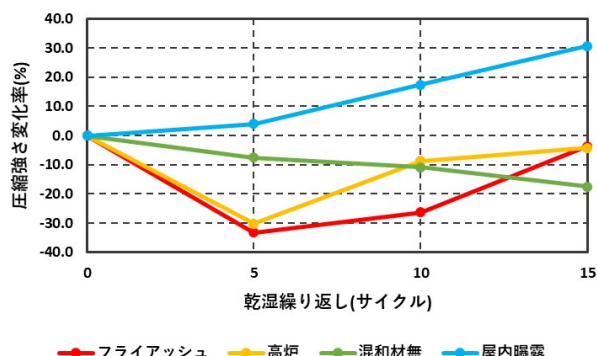


図-14 圧縮強さ(変化量)の推移

6. 結論

本研究はニューカレドニアでのローモンタイトの乾燥湿潤によるコンクリート劣化の対策策定の検討や、日本において現時点で定量的な基準が定められていないローモンタイトが与えるコンクリートへの影響の新たな見地を得ることを目的とし、以下のことを得た。

- 1) ニューカレドニアのサンプル No.1, No.1 (白) を用いた定性分析の結果から、ローモンタイトの産状は目視による確認は困難であるため、含有の有無については粉末 X 線回析による確認が必要である。
- 2) ニューカレドニアのサンプルはローモンタイトが最大約 6% 含有しており、コンクリート用骨材に使用した際、乾湿が繰り返される条件下では劣化を及ぼす可能性が高い。
- 3) ローモンタイトは直接水や空気に曝される場合、結晶構造が早期に崩れ粉状化する。
- 4) セメントペーストに単結晶を埋没させた供試体は乾燥湿潤を促進させることでその形態変化を短期間で確認することができるが、相対的な含有量が小さくなるローモンタイト含有骨材を使用したモルタル供試体は、材齢 196 日では劣化による強度低減は確認できず、長期による観測が必要である。
- 5) 混和材を使用した供試体は混和材を使用していない供試体と比較して強度が増進傾向にあり、ローモンタイトの変質による影響が短期では受けにくい可能性がある。

謝辞

本研究にあたり、2019 年度卒研生の佐藤君、加藤君、2020 年度卒研生の小嶋君、野間君の協力を得た。

参考文献

- 1) Pearson J.C. and Loughlin G.F. : An interesting case of dangerous aggregate (1923)
- 2) American Society for Testing and Materials, Standard descriptive nomenclature of constituents of natural mineral aggregates. ASTM Designation, C294-69, 1969 Book of ASTM Standards with Related Material, Part 10, Concrete and Mineral Aggregates, pp.219~229. (1969)
- 3) 有泉昌：コンクリート用骨材の問題点, 粘土科学, Vol.19, No.2, pp.41~55. (1979)
- 4) 丸章男, 柳田力：岩石鉱物学・地質学的にみた骨材の選択, コンクリート工学, Vol.19, No.11, pp.85~89, (1981)
- 5) 尾藤, 永嶋, 斉藤：骨材の化学的安定性について, セメント技術年報 35, pp.170-173. (1981)
- 6) Shigekura : Deleterious substances in aggregates. Concrete Jour. Vol. 19, No.11, 105-108. (1981)
- 7) JCI Committee on Durability Diagnosis of Concrete Structures, Proposed JCI standard : Methods for durability diagnosis of concrete structures, Concrete Jour. Vol.26, No.7, 125-137 (1988)
- 8) 藤井, 小林：我が国におけるコンクリート用骨材の最近の動向, 材料, Vol.40, 1241-1246 (1991)
- 9) 川村：骨材とコンクリート構造物の耐久性-有害な含有鉱物の影響, 材料, Vol.40, 1603-1609 (1991)
- 10) Wakizaka Y. and Anan S. : Deterioration of concrete due to laumontite and its mechanism, Proc. Int. Symposium on Industrial Minerals and Building Stones, IAEG, pp.647~654. (2003)
- 11) Les Nouvelles Caledoniennes, La zeolite, cancer du beton, (24,07,2016)
- 12) M.E.Kaley. : Laumontite and Leonhardite cement in Miocene sandstone from a well in San Joaquin Valley, California (1955)
- 13) Arturo Bravo : Dehydration-hydration reactivity of laumontite : analyses and tests for easy detection (2017)
- 14) コンクリート標準示方書 [施工編], 土木学会, 47p. (2013)
- 15) 針生, 吉田：ダム建設にともなう骨材の問題, 応用地質 (株), 内部資料
- 16) Yamazaki A., Siraki T., Nishido H. and Otsuka R. : Phase change of laumontite under relative humidity-controlled conditions, Clay Science, Vol.8, No.2, pp.79~86. (1991)
- 17) Gottardi G. and Galli E. : Natural Zeolite, Springer-Verlag, pp.100~110. (1985)
- 18) 脇坂, 阿南：濁沸石によるコンクリートの劣化機構-濁沸石による膨張圧の発生-, 平成 15 年度研究発表会講演論文集, 日本応用地質学会, pp.105~108. (2003)
- 19) 渡邊 凌、岩月栄治, 「コンクリート用骨材に含まれるローモンタイトの定量に関する研究」, 令和元年度土木学会中部支部研究発表会, (2020)
- 20) 荒井融, 名取次郎：粉末 X 線回析法による骨材中の有害鉱物の定量化について, 応用地質 32 巻 5 号, pp.13~2, (1991)
- 21) 丸章男：骨材品質に関わる耐久性の診断方法-岩石・鉱物学的手法-, コンクリート学会, Vol.26, No.27< pp.40-48.
- 22) 株式会社テクノ中部：コンクリート用フライアッシュの品質規定, 2021 年 2 月 10 日閲覧
<https://www.techno-chubu.co.jp/ash/fly-ash/>
- 23) エスメント中部株式会社：コンクリート用高炉スラグ微粉末, 2021 年 2 月 10 日閲覧
<http://www.esment.jp/es02/es02.html>

(受理 令和 3 年 3 月 19 日)